第 40 卷　第 3 期　　天　文　学　进　展　　Vol. 40,　No. 3
2022 年 9 月　　PROGRESS IN ASTRONOMY　　Sept., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.03.02

激光扫描仪测量天线结构变形研究进展

唐健森[1]，付　丽[2]，王锦清[2]，王　旭[1]，刘海明[3]，刘庆会[2]

(1. 重庆交通大学 土木工程学院，重庆 400074；2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030；3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司，重庆 400067)

摘要： 激光扫描测量方法具有快速、自动和非接触等优点，但是测量精度在毫米量级。综述了激光扫描仪在天线结构变形测量中的应用，它可以对望远镜的焦距及信号路径长度变化、VLBI 参考点的稳定性和面板错位等进行有效测量。同时介绍了提高系统测量精度的关键技术，包括 2 面测量和现场标定等测量手段，简化点云、增加修正系数和正交距离回归等数据处理方法。这些方法和结果可为高效测量射电望远镜天线结构的变形提供参考。

关　键　词： 射电望远镜；激光扫描仪；焦距；面板错位；信号路径长度；VLBI

中图分类号： P111.44　　　**文献标识码：** A

1　引　言

随着我国航天事业和天文学研究的快速发展，对射电望远镜的灵敏度和分辨率要求越来越高。但是天线结构在重力等载荷作用下会引起面形精度、焦距和信号路径长度等变化，将直接导致望远镜性能下降。因此，有必要对结构变形进行测量、掌握变形规律，并进行有效控制。

目前，天线结构变形的测量方法有[1]：经典测量法、摄影测量法、微波全息法、激光测量法等，每种方法有各自的优缺点。本文主要调研十多年前才应用于地面天线测量的激光扫描测量方法的进展情况。它具有速度快、非接触、高密度和自动化等优点，但是随着测量距离和测量范围的增大，测量精度会有所下降，需要采取有效的测量和数据分析方法提高测量精度。

本文将瞄准本领域国际研究前沿，介绍激光扫描测量法的关键技术、可能的解决办法及在天线结构测量中的应用等。

收稿日期： 2021-12-13；　**修回日期：** 2022-01-30

资助项目： 国家重点研发计划资助项目 (2018YFA0404702)；国家自然科学基金项目 (Y787111002, Y347201001, 11873015)；上海市科学技术委员会科研计划项目 (08DZ1160100)；中国科学院知识创新工程重大项目 (KJCX-YW-18)

通讯作者： 付丽，fuli@shao.ac.cn

2 激光扫描仪的测量方法及数据采集

了解激光扫描仪的测量方法，可根据天线结构的口径、测量距离和测量精度等，合理选择测量仪器，并有助于研究提高测量精度的技术。

2.1 激光扫描仪的测量方法

激光扫描仪可以按照维数、平台、应用范围、测程、光源和测距方法等分类[2]。针对天线结构变形的测量，选择三维、地面、中距离和半导体激光的测量型仪器，但是选择哪种测距方法，需要根据实际情况确定。其测量方法主要包括测距、测角、扫描、定位和图像获取五个方面。

2.1.1 测距方法

测距的质量直接影响激光扫描仪的精度，扫描仪按照测距原理可分为三角法、脉冲法和相位法[2,3]。

(1) 三角法

三角测距法属于不同轴测距，即激光信号的发射光路与反射光路不在同一轴线上。三角法是借助三角形的几何关系，求得扫描中心到目标的距离。激光发射点与接收点位于基线两端，并与目标反射点构成一个空间平面三角形。由于基线通常较小，决定了三角法只适合近距离测量，精度随距离的增加迅速下降。

(2) 相位法

相位法测距是用无线电波段的频率，对激光束进行幅度调制，通过测定调制光信号在被测距离上往返传播所产生的相位差，间接测定往返时间，并进一步计算出被测距离。设激光信号往返传播产生的相位差为 ϕ (单位为 rad)，调制频率为 f (单位为 Hz)，所测距离 S (单位为 m) 为：

$$S = \frac{c}{2}\left(\frac{\phi}{2\pi f}\right) \quad . \tag{1}$$

该方法只能用单一频率测距，为了提高测距精度就必须使调制频率 f 的值增大，而当增大 f 值时，测尺变小，测量远距离目标时会产生整周模糊度问题；因此，这种测距方式适合中程测量，主要应用于精密测量和医学研究。

(3) 脉冲法

脉冲测距法是通过测量发射和接收光脉冲信号的时间差来间接计算获得被测目标的距离。设目标距离为 S，光速为 c，测得信号往返时间为 Δt，则有：

$$S = \frac{1}{2}c\Delta t \quad . \tag{2}$$

从式 (2) 可看出，影响脉冲法测距的因素主要有 c (单位为 m·s^{-1}) 和 Δt (单位为 s)，而 c 的精度由大气折射率 n 所决定，目前 n 的测定精度能达到 10^{-6}，对测距影响很小。Δt 的确定可以通过前沿判别、高通容阻判别、恒比值判别或全波形检测技术等方法，保证测定精度。脉冲法的测量距离较远，但是测距精度较低，目前大多数车载、机载激光扫描仪都使用这种测距方式，主要在大比例尺地形测绘等方面有较好的应用。

2.1.2　测角方法

区别于常规仪器的度盘测角方式，三维激光扫描仪通过改变激光光路获得扫描角度。把两个步进电机和扫描棱镜安装在一起，分别实现水平和垂直方向扫描。步进电机是一种将脉冲信号转换成角位移的控制微电机，可以实现对激光扫描仪的精确定位。在扫描仪工作的过程中，通过步进电机的细分控制技术，获得稳步、精确的布距角 θ_b：

$$\theta_b = \frac{2\pi}{N_r m b} \quad , \tag{3}$$

其中，N_r 是电机的转子齿数，m 是电机的相数，b 是各种连接绕组的线路状态数及运行拍数。

在得到 θ_b 的基础上，可得扫描棱镜转过的角度值，再通过精密时钟控制编码器同步测量，便可得每个激光脉冲横向、纵向扫描角度观测值。

2.1.3　扫描方法

激光扫描仪通过机械扫描装置来精密控制扫描棱镜的转动，决定激光束出射方向，从而使脉冲激光束沿横轴和纵轴方向扫描。激光扫描系统所采用的扫描装置主要有四种：摆动扫描镜、旋转正多面体扫描镜、旋转棱镜扫描镜和光纤扫描镜。其中，三维激光扫描仪多采用前两种扫描镜，后两种扫描镜多在机载激光扫描仪中使用。

2.1.4　定位方法

激光扫描仪通过测角测距，获得距离 S (单位为 m)、水平角 α (单位为 rad) 和垂直角 θ (单位为 rad)。由极坐标原理可得目标点在测站局部坐标系下的三维坐标：

$$\begin{cases} X = S\cos\theta\cos\alpha \\ Y = S\cos\theta\sin\alpha \\ Z = S\sin\theta \end{cases} . \tag{4}$$

2.1.5　图像获取

激光扫描仪配合相机使用可以获取场景的照片。通过标定两者的位置关系，可以求得扫描仪测站坐标系和像空间坐标系的转换关系，从而获得目标每个扫描点的 RGB 值。激光扫描仪获取的对象表面的巨量三维数据点又称为点云，将点云用同一种颜色表示，可构成三维二值图像；激光扫描仪不仅记录目标点的空间几何信息，还记录能反映目标材料、质地等属性的信息，即回光强度信息。根据激光扫描仪记录的回光强度给点云赋予不同的颜色，则得到三维伪彩色图像，这种图像可用于目标的识别和分类；若将每个点赋予相机获取的 RGB 值，则可得到三维真彩色图像。

2.2　数据采集和处理

2.2.1　数据采集流程

激光扫描仪数据采集需经历以下五个步骤：准备计划、粗扫、拼接、精扫和拍照[2]。详细采集流程如图 1 所示。

2.2.2　数据处理流程

激光扫描仪系统的全部工作流程可分为外业数据获取和内业数据处理[4]，内业数据处理

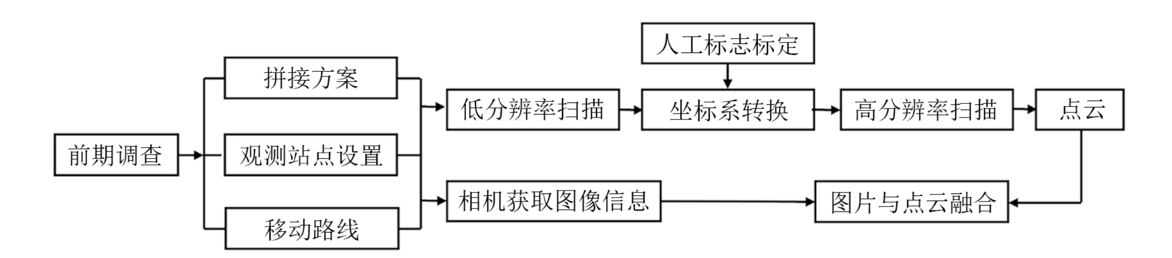


图 1 数据采集流程图[2]

又包括建立格网结构、滤波与光顺、孔洞修补、点云重采样和点云简化等方面，见图 2。

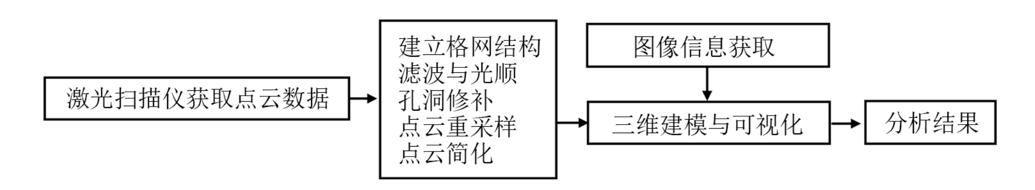


图 2 数据处理流程图[4]

对于大口径射电望远镜，需要在几个测站下完成面形的测量，各测站之间坐标系的转换，即多站拼接精度是扫描技术的难点。

3 激光扫描仪的应用和作用

2009 年，Sarti 等人[5]首次将激光扫描仪应用在射电望远镜的重力变形测量中，随后一些学者也展开了相关研究 (见表 1)。研究发现，激光扫描仪虽然具有快速和高效等优点，但是与全站仪等相比，精度略差，直接用于毫米波天线面形测量效果不好，不过在焦距及与之相关的信号路径变化、VLBI 天线参考点稳定性和面板错位等方面的应用效果较好。

3.1 焦距和信号路径长度变化

2009 年，Sarti 等人[5]利用激光扫描仪分别对位于意大利 Medicina 和 Noto 的 2 个 32 m 射电望远镜的重力变形进行了测量和分析，扫描仪选用 Trimble-Mensi 公司的 GS200，测量范围小于 100 m，精度为 3 mm。测量数据通过坐标转换及 2 个测站点云拼接后，通过最小二乘法做最佳吻合抛物面拟合，得到拟合后残差的标准差，结果显示扫描仪在评价主面的整体性能方面效果不理想，但是获得的焦距的变化规律是可以接受的。

设计坐标系中，抛物面方程为：

$$\frac{X_j^2+Y_j^2}{4f}-Z_j=0\ , \tag{5}$$

式中，X_j, Y_j 和 Z_j 为设计抛物面上点的坐标，f 为焦距 (单位为 m)。

表 1　激光扫描仪在射电望远镜上的应用情况

射电望远镜	激光扫描仪	扫描仪精度 观测范围 /m	精度 /mm	光束发散度 /μrad
意大利 Medicina 和 Noto 32 m 射电望远镜[5−6,21]	Trimble-Mensi GS200	小于 100	3	32
瑞典 Onsala 20 m 射电望远镜[7−8]	Leica Scan Station P20	小于 50 小于 100	3 6	200
德国 Effelsberg 100 m 射电望远镜[9−10,18,22−24]	Leica HDS 6100	小于 25 小于 50	2 ～ 3 3 ～ 5	125
瑞典 Onsala 20 m 射电望远镜[11,14,16−19]	Leica HDS 7000	0.3 ～ 187	1	300
新西兰 Warkworth 30 m 射电望远镜[12,25]	FARO laser scanner	0.3 ～ 120	1	300
波兰哥白尼大学天文中心 32 m 射电望远镜[13]	Riegl VZ 400	1.5 ～ 600	3	300
上海 65 m 射电望远镜[15]	Riegl VZ 401	1.5 ～ 600	3	300
密云 50 m 射电望远镜[1]	FARO Focus 3D S 150	小于 150	1	

然后，进行设计坐标系与测量坐标系之间的转换，即

$$\boldsymbol{X}_j=\begin{bmatrix}X_j\\Y_j\\Z_j\end{bmatrix}=\boldsymbol{R}_y(\phi_y)\cdot\boldsymbol{R}_x(\phi_x)\cdot\boldsymbol{x}_j+\boldsymbol{X}_\nu\ , \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{R}_x$ 和 $\boldsymbol{R}_y$ 为转换矩阵，$\boldsymbol{X}_\nu$ 为顶点位移向量，$\boldsymbol{x}_j$ 为测量点的三维坐标，其计算表达式为：

$$\boldsymbol{x}_j=\begin{bmatrix}x_j\\y_j\\z_j\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}s_j\sin\beta_j\cos t_j\\s_j\sin\beta_j\sin t_j\\s_j\sin\beta_j\end{bmatrix}\ , \tag{7}$$

式中，s_j, β_j 和 t_j 分别为由激光扫描仪测量的点的距离、水平角和垂直角。

最终，采用经典的最小二乘法 (classical least squares, CLS)，获得主面顶点 3 个方向的位移 X_v, Y_v, Z_v 和 2 个方向的转角 ϕ_x, ϕ_y 及焦距变化 dF 参数。

进一步，焦距的变化与信号的路径长度变化有直接关系，具体表示为[1]：

$$\delta \mathrm{d}L=\alpha_f\mathrm{d}F+\alpha_\nu\mathrm{d}V+\alpha_r\mathrm{d}R\ , \tag{8}$$

式中，$\delta\mathrm{d}L$ 为信号路径长度的变化，dF 为焦距的变化，dV 为主面顶点的移动，dR 为接收机的移动，α_f, α_ν 和 α_r 为与后 3 项相关的系数。其中 α_f 为与焦距变化相关的系数，表达式为[6]：

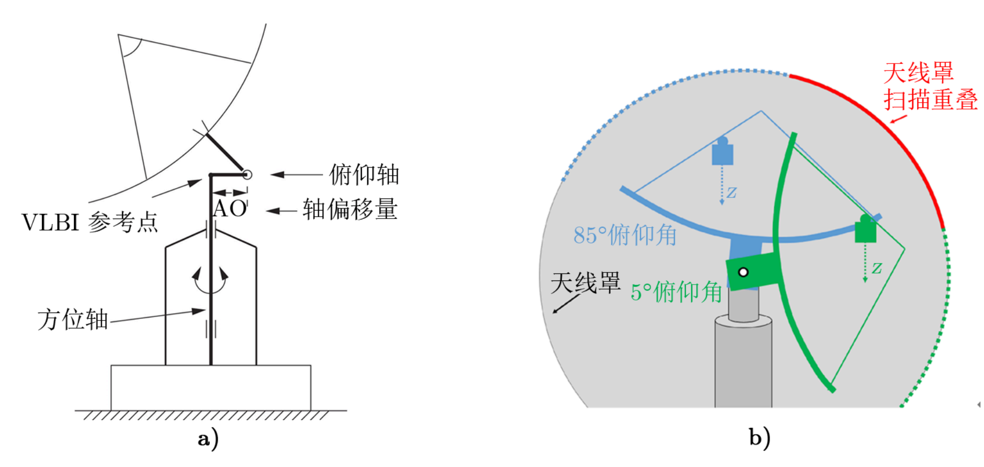
$$\alpha_f=2-(8f^2/r_0^2)\ln(1+r_0^2/4f^2)\ , \tag{9}$$

式中 f 为焦距，r_0 为主面半径 (单位为 m)。

Sarti 等人[6]分析了 Medicina 32 m 射电望远镜信号路径的变化，分别由激光扫描仪测量了焦距变化、有限元计算了主面顶点变化和有限元结合测量分析了接收机的运动，并最终由公式 (8) 计算了信号路径的变化，研究结果表明天线结构重力变形引起的信号路径偏差是不可忽略的。

3.2 VLBI 参考点的稳定性

用于 VLBI 测量的望远镜参考点的位置会直接影响 VLBI 测量的精度。Holst 等人[8]以 Onsala 20 m 射电望远镜 (见图 3) 为研究对象，利用激光扫描仪测量分析了重力载荷下参考点的稳定性。具体分为 4 步：(1) 扫描仪坐标系下，获得各俯仰角下的主面顶点参数；(2) 将所有俯仰角下的向量转换到同一稳定的参考坐标系 (多站拼接采用了各测站重叠点云的方法，重叠点云为图 3 b) 中红线显示的天线罩部分)；(3) 参数化所有向量的绝对运动；(4) 分析旋转中心的精度。在实际应用中，测量得 Onsala 20 m 射电望远镜参考点的稳定性为 0.3 mm。

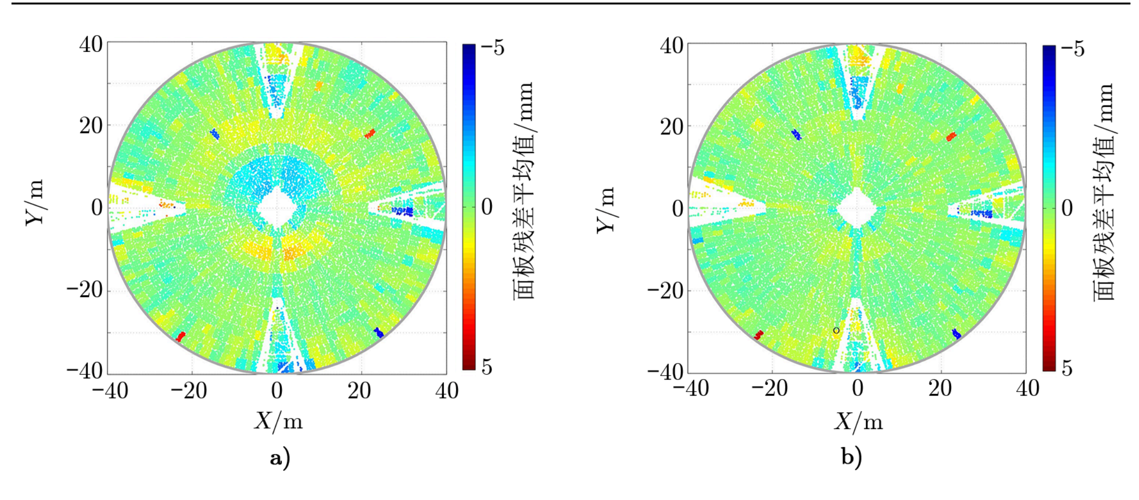


注：a) VLBI 参考点位置示意图；b) 不同俯仰角下测量的重叠点云位置示意图。

图 3 Onsala 20 m 射电望远镜[8]

3.3 面板错位

Holst 等人[8]对 Effelsberg 100 m 射电望远镜的激光扫描数据进行了深入分析，提出拟合后残差包括三部分：随机误差、系统误差和主面的局部变形。先通过每块面板所有残差的平均和系统标定修正随机误差和系统误差；然后利用已知面板及其采样点的位置，计算每块面板拟合残差的平均值，可以得到每块面板的偏移；再通过不同俯仰角下的测量结果验证面板是否错位。图 4 显示的是实际测量的结果，图 4 a) 中有 6 块面板偏差达到约 5 mm (其他面板偏差在 2 mm 以内)，而且在其他俯仰角下偏差也很大 (见图 4 b))，说明这几块面板可能产生了错位，其中对称分布的 4 点是为了全息测量人为控制的，而右上角的 2 块面板是真正产生了错位。



注：a) 90° 俯仰角；b) 45° 俯仰角。

图 4　Effelsberg 100 m 射电望远镜面板错位测量云图[10]

3.4　面形测量

Rasha 等人[12]利用 FARO 激光扫描仪测量了 Warkworth 30 m 射电望远镜主面和副面的面形，仪器在 (0.3 ～ 120) m 范围内的精度为 1 mm。在进行数据分析时，采用了主成分分析 (principal component analysis) 和最小二乘法，得到不同俯仰角下主副面的面形精度 (如表 2 所示)。不同俯仰角下相关系数在 0.972 ～ 0.986 内，表明测量和数据处理方法是有效的，但是没有得到有意义的面形，由鲁兹公式推算该扫描仪适用于厘米波天线面形的测量。

表 2　不同俯仰角下主副面的面形精度

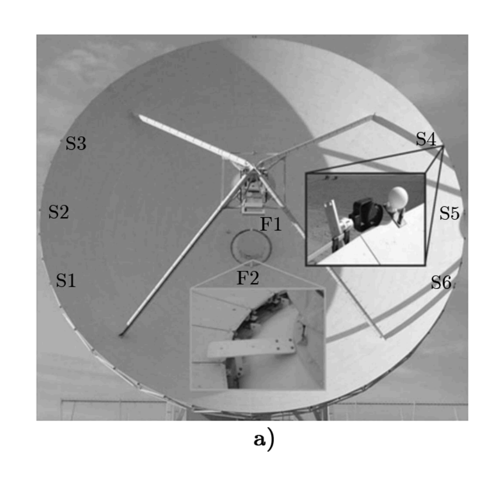
俯仰角/(°)	均方根 (主面)/mm	均方根 (副面)/mm	相关系数
90	1.42	1.42	0.986
80	1.16	1.43	0.979
70	1.12	1.30	0.983
60	1.52	1.12	0.972
50	1.53	1.10	0.981
40	1.45	1.10	0.984
30	1.47	1.07	0.985
20	1.47	1.03	0.986
10	1.67	1.06	0.987
6	1.65	1.01	0.982

4 关键技术

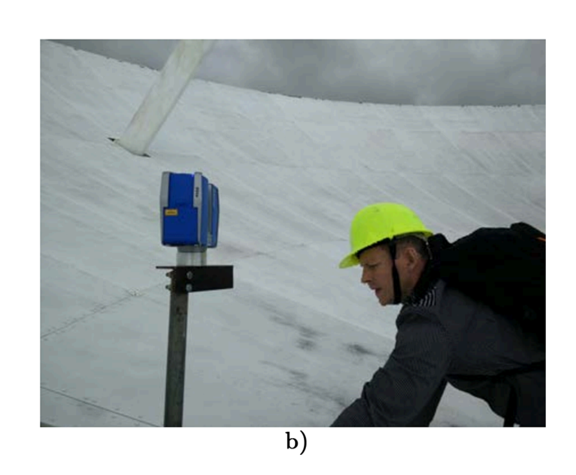
4.1 安装位置及安装方式

Effelsberg 100 m 射电望远镜的激光扫描仪安装在主焦点附近[9]，格里高利副面的下面，头朝下。起初，扫描仪被刚性地固定在结构上，随着主面的旋转而旋转，此时扫描仪的测量距离范围为 (30 ~ 50) m，能够一站式完成整个面的测量。后来，怀疑这种刚性固定方式可能会损坏扫描仪或者引起测量偏差[10]，进一步的改进措施是建立一个稳定的铰，使扫描仪可以像钟摆一样摆动，保证扫描仪一直处于竖直状态。但是，由于仪器的视场是 270°，改进措施的缺点是在低仰角时不能扫描到完整的主面。Onsala 20 m 射电望远镜的扫描仪安装在副面撑腿上[7]，也采用了类似的柔性铰连接，但是在数据分析时发现个别俯仰角下的测量数据无效，原因是铰的稳定性不好，导致测量误差。

另外，也有将激光扫描仪安装在主面上，通过多站式拼接完成测量。Medicina 32 m 射电望远镜为卡塞格伦式望远镜[5]，激光扫描仪安装在主面中心馈源旁边 F1 和 F2 点 (见图 5 a))，扫描仪可以方位 360° 和俯仰 60° 旋转，通过在 F1 和 F2 点进行扫描后再拼接，完成整个面的测量。Warkworth 30 m 射电望远镜的扫描仪安装在距离主面中心位置约 10 m 的支架上 (见图 5 b))，可以同时对主面和副面进行测量。



a)


b)

注：a) Medicina 32 m 射电望远镜；b) Warkworth 30 m 射电望远镜。

图 5 激光扫描仪安装位置[5,12]

扫描仪安装在副面或者撑腿上能够一站完成测量，但是不同俯仰角时长力臂不稳定，可能会带来测量误差；扫描仪安装在主面上避免了上述问题，但是引入了多站拼接误差。另外，扫描仪的安装还要考虑测量策略，尽量使激光入射角度在 10° ~ 45° 之间，以获得合理的激光点的强度，保证测量精度。

4.2　测量方法

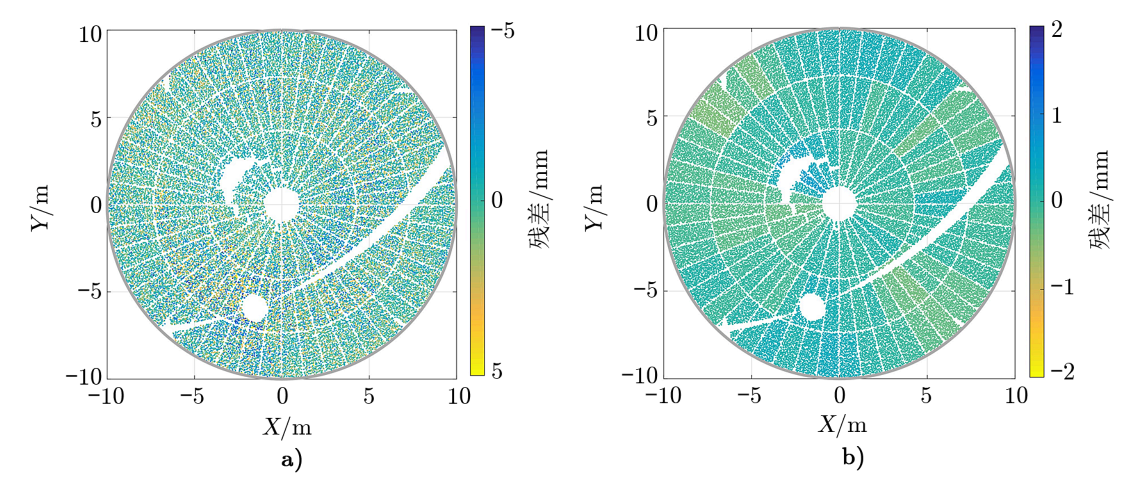
一般情况下，激光扫描仪是在标定场，通过不同测站扫描标靶或者平面，获得标定参数。但是，研究发现这种方式标定的设备在进行天线结构变形测量时系统误差会大于随机误差，因此采取现场不同俯仰角下对系统进行标定[10]，获得每个俯仰角下的标定参数，减小系统误差。

另外，还可以通过 2 次扫描来修正系统误差，即扫描仪 0° ~ 180° 测量一次，180° ~ 360° 再测量一次[14]，两次测量合并在一个点云里进行数据分析，该方法只需要双倍的测量时间，不需要其他额外处理。

在进行 Onsala 20 m 射电望远镜天线结构变形测量时，首先现场标定了对两面测量敏感的 7 个参数 (见式 (10))[7]，图 6 为俯仰角 45° 标定前后天线主面变形残差，对比发现系统误差修正效果明显。但这 7 个参数只适用于这个现场环境，这种测量策略。

$$\boldsymbol{P}_{\mathrm{calib}} = [x_{1z},\ x_3,\ x_{5z-7},\ x_6,\ x_{1n+2},\ x_4,\ x_{5n}]^{\mathrm{T}} \tag{10}$$

式中，x_{1z} 为竖直光束偏差，x_3 为镜子偏差，x_{5z-7} 水平轴误差，x_6 为视准轴误差，x_{1n+2} 为水平光束偏差，x_4 为竖直偏差，x_{5n} 为水平光束倾斜。



注：a) 标定前；b) 标定后。

图 6　Onsala 20 m 射电望远镜主面变形残差[7]

4.3　数据处理

(1) 点云简化

Holst 等人[10]提出了点云的简化策略。通过激光扫描测量距离范围和测量强度阈值 (经验值)，将主面与背景分离；通过评估点的偏差和设定阈值 5 cm，删除偏差较大的点，如副面撑腿遮挡处。面板之间的接缝如果过大，需要删除扫描到的面板支撑结构的点，并尽量保证测量点均匀分布。

(2) 修正系数

李干[15]利用 Riegl 公司生产的 VZ400 激光扫描仪，测量了上海 65 m 射电望远镜主面背架结构的重力变形。在公共点转换模型上引入测距加、乘两个未知参数，建立 8 参数最小二乘模型，经加、乘常数改正后，在 30 m 范围内，点位测量外符合精度 1.0 mm，内符合精度 0.5 mm。

(3) 正交距离回归法

最小二乘法是经典的测量数据分析方法，它是对激光扫描仪测量点的距离、水平角和垂直角进行线性化，为代数拟合。Holst 等人[9]提出了正交距离回归法 (orthogonal distance regression, ODR)，在建立数据分析模型时，直接对抛物面本身 (即抛物面上点的坐标) 进行线性化，ODR 为几何拟合，拟合精度更高，且有实际的物理意义，即实际偏差。进一步，根据焦距不随旋转抛物面在空间的位置和方向变化的特点[20]，比较两种方法焦距的稳定性。图 7 显示了基于 CLS 方法，不同俯仰角下抛物面绕 z 轴做 360° 旋转时焦距的变化。表 3 列出了两种方法的对比结果，发现 ODR 方法获得的焦距非常稳定。

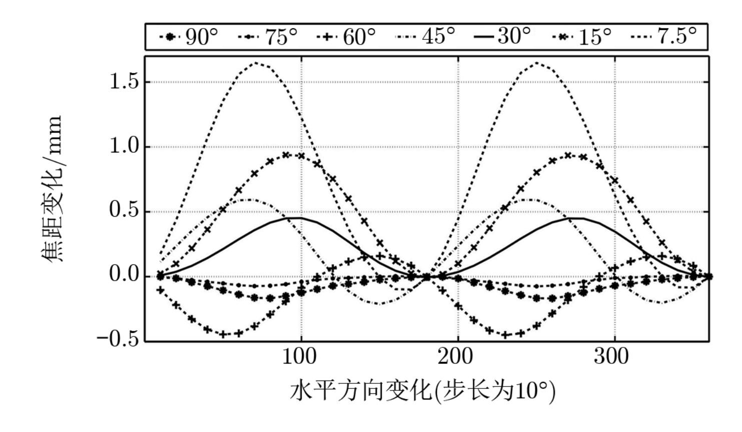


图 7 基于 CLS 方法的不同俯仰角下抛物面绕 z 轴做 360° 旋转时焦距的变化

表 3 不同俯仰角下抛物面基于两种方法旋转时焦距的变化

俯仰角/(°)	CLS/mm	ODR/mm
90	0.2	0.0
75	0.1	0.0
60	0.6	0.0
45	0.8	0.0
30	0.5	0.0
15	0.9	0.0
7.5	1.7	0.0

注：调整是在经典最小二乘法 (CLS) 和 ODR 内执行的。

5 展 望

激光扫描仪测量天线结构变形是未来大型天线面形测量方法的主要发展方向之一，但同时这种方法也存在测量精度不足等一些问题，而测量精度是制约激光扫描仪在天线结构变形测量中应用的主要因素。除了寄希望于设备制造商在制造过程中对工艺流程的把控，以提高设备测量精度，还可以通过以下几种方式尽量减小系统误差和随机误差。

(1) 优化扫描仪的安装位置和安装方式。激光扫描仪的安装位置和安装方式在很大程度上决定了测量误差的大小。

(2) 现场不同俯仰角下两面测量进行系统标定。通过对不同俯仰角下的激光扫描仪系统进行测量标定，获得每个俯仰角下的标定参数，这种方法可以大大减小系统误差。

(3) 进行滤波与光顺，减小噪声，削减随机误差。在实际测量过程中，受各种人为或环境因素的影响，使得测量结果包含噪声，通过在建模前降低或消除噪声，可以提高后续数据处理的效率和质量。

(4) 改进多站点云拼接方法。为了获取物体整个表面的数据，有时需要从不同视角进行多次测量，将各个视角得到的点云合并到统一的坐标系下的过程称为多站拼接，多站点云拼接的方法可以分为直接法、特征法和辅助法。基于这三种方法提出原理更为简单，拼接结果更为可靠的方法，也将为激光扫描仪测量精度的提高作出贡献。

参考文献：

[1] 汪赞, 孔德庆, 陈志平. 天文研究与技术, 2020, 17(01): 52
[2] 李广云, 李宗春. 工业测量系统原理与应用. 北京: 测绘出版社, 2011: 145
[3] 张启福. 硕士论文, 郑州: 解放军信息工程大学, 2012: 16
[4] 王勋. 硕士论文, 重庆: 重庆交通大学, 2015: 26
[5] Sarti P, Vittuari L, Abbondanza C. Journal of Surveying Engineering, 2009, 135(4): 136
[6] Sarti P, Abbondanza C, Vittuari L. Journal of Geodesy, 2009, 83(11): 1115
[7] Holst C, Schunck D, Nothnagel A, et al. Sensors, 2017, 17(8): 1833
[8] Holst C, Nothnagel A, Haas R, et al. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2019, 149: 67
[9] Holst C, Zeimetz P, Nothnagel A, et al. Journal of Surveying Engineering, 2012, 138(3): 126
[10] Holst C, Nothnagel A, Blome M, et al. Journal of applied geodesy, 2015, 9(1): 1
[11] Bergstrand S, Herbertsson M, Rieck C, et al. Journal of Geodesy, 2019, 93(5): 669
[12] Rasha A, Natusch T, Granet C, et al. Journal of Astronomical Instrumentation, 2019, 8(03): 195
[13] Figurski M, Wrona M, Pazderski E. Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining Conference Proceedings. 2014, 2(1): 1
[14] Holst C, Medić T, Kuhlmann H. Journal of Applied Geodesy, 2018, 12(2): 169
[15] 李干. 硕士论文. 郑州: 解放军信息工程大学, 2012: 20
[16] Nothnagel A, Holst C, Haas R. Journal of Geodesy, 2019, 93(10): 2019
[17] Holst C, Medic T, Nothnagel A, et al. 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring (JISDM), Greece: JISDM. 2019: 1

[18] Bergstrand S, Haas R, Herbertsson M, et al. Proc 23rd EVGA Working Meeting, Gothenburg: EVGA 2017: 61
[19] Lösler M, Haas R, Eschelbach C, et al. Journal of Geodesy, 2019, 93(10): 2069
[20] Ahn S J, Rauh W, Cho H S, et al. IEEE T Pattern Anal, 2002, 24(5): 620
[21] Sarti P, Abbondanza C, Negusini M, et al. The Role of VLBI in the Golden Age for Radio Astronomy, 2008, 9: 54
[22] Nothnagel A, Eichborn M, Holst C. Proceedings of the 21st meeting of the European VLBI group for geodesy and astrometry, Helsinki. 2013: 55
[23] Artz T, Springer A, Nothnagel A. Journal of Geodesy, 2014, 88(12): 1145
[24] Holst C, Kuhlmann H. Journal of applied geodesy, 2016, 10(1): 17
[25] Woodburn L, Natusch T, Weston S, et al. Publications of the Astronomical Society of Australia, 2015, 32: 1

Progress in Research of Deformations of Antenna Structures by Laser Scanner Measurements

TANG Jian-sen[1], FU Li[2], WANG Jin-qing[2], WANG Xu[1], LIU Hai-ming[3], LIU Qing-hui[2]

(1. Chongqing Jiaotong University, School of Civil Engineering, Chongqing 400074, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. China Merchants Chongqing Communications Technology Research & Design Institute Co. ltd., Chongqing 400067, China)

Abstract: The laser scanning measurement method has the advantages of fast, automatic and non-contact, but its measurement accuracy is on the order of millimeter. It is necessary to study how to ensure measurement accuracy and what measurements can be made with existing accuracy.

This paper reviews the progress of laser scanner applied for measuring the deformations of antenna structures. It can effectively measure the focal length variations and signal path length variations, stability of reference point of VLBI and panel misalignment. Simultaneously, we list the key technologies to improve the measurement accuracy of the system, including the measurement methods of two-face measurement and in-suit calibration, and data processing methods of optimizing point cloud, adding correction coefficients and orthogonal distance regression.

Laser scanning measurement provides guarantee for monitoring structural deformations and improving VLBI measurement accuracy. The investigated results provide a reference for the efficient measurement of antenna structure deformation of radio telescope.

Key words: radio telescope; laser scanner; focus; panel misalignment; signal path length; VLBI